Ingeniería y Ciencia, ISSN 1794-9165
Volumen 1, número 1, páginas 67-76, marzo de 2005

Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia[1]

Victoria González[2], Juan Carlos Botero[3], Roberto Rochel[4], Julián Vidal[5] y Martha Álvarez[6]

Recepción: 26 de julio de 2004 — Aceptación: 14 de septiembre de 2004
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Se presentan resultados del análisis estadístico aplicado al estudio experimental que determina las propiedades mecánicas de aceros colombianos sometidos a cargas monotónicas de tracción. Se obtienen curvas típicas de esfuerzo-deformación que permiten caracterizar aceros nacionales estudiados haciendo énfasis en las variables que determinan el cambio de comportamiento del material.

Palabras claves: acero, esfuerzo, deformación, tracción.

Abstract

A statistical analysis applied to a experimental study that determines the mechanical properties of steels produced in Colombia subjected to monotonic loads of tension is presented. Typical stress-strain diagram that allow to characterize these steels making emphasis in the variables that determine the change of behaviour of the materia are presented.

Key words: steel, stress, strain, traction.

1 Introducción

En la literatura técnica se encuentran variaciones entre los resultados analíticos y experimentales de respuestas de edificios sometidos a eventos sísmicos. Estas diferencias son ocasionadas por las incertidumbres involucradas en el proceso de diseño, las cuales hacen

[1] Trabajo realizado con el apoyo de Colciencias, Aceros Diaco y la Universidad EAFIT.
[2] Ingeniera Civil, vgonzal1@eafit.edu.co, asistente de investigación, Universidad EAFIT.
[3] Doctor en Ingeniería (estructuras), jcbotero@eafit.edu.co, profesor, Universidad EAFIT.
[4] Maestro en estructuras, rrochel@eafit.edu.co, profesor, Universidad EAFIT.
[5] Especialista en Geotecnia, jvidal@eafit.edu.co, profesor, Universidad EAFIT.
[6] Especialista en Sistemas de Información, ealvarez@eafit.edu.co, profesora, Universidad EAFIT.

referencia a la variación entre la resistencia real y nominal de los materiales, las diferencias entre las solicitaciones reales y las empleadas en el diseño, y el grado de aproximación obtenido entre el modelo propuesto y el construido [1].

Con el objetivo de reducir las incertidumbres en la variación de la resistencia de los materiales, particularmente la del acero de refuerzo, se desarrolló un proyecto de investigación que permite correlacionar los criterios teóricos que determinan las propiedades mecánicas del acero y los obtenidos mediante ensayos experimentales. En este estudio se fallaron a tracción 477 probetas de acero de diferentes marcas y diámetros, con el fin de obtener las curvas completas esfuerzo-deformación.

Una vez ejecutados los ensayos, se realizó un análisis estadístico de las variables principales que definen las propiedades mecánicas del acero clasificándolas según el diámetro de la varilla ensayada y la empresa productora. Con estos resultados se elaboraron curvas típicas de esfuerzo-deformación, asociadas al percentil 5 y 95.

2 Descripción del programa experimental

Se efectuaron ensayos de tensión monotónica en 477 probetas pertenecientes a siete empresas productoras de acero que abastecen el mercado nacional, con diámetros comprendidos entre $\left(\frac{3}{8}\right)''$ y $1''$.

Los ensayos fueron realizados utilizando una máquina universal con capacidad de carga de $1000\,KN$ y fueron controlados por diferentes velocidades de deformación que varían según la zona de la curva esfuerzo-deformación.

Para la adquisición de datos se empleó el desplazamiento de la máquina universal y un extensómetro con longitud calibrada de $50\,mm$. Cuando se alcanzaron alargamientos que oscilan entre $1\,mm$ y $6\,mm$, se retiró el extensómetro y se continuó midiendo el alargamiento con el de la máquina.

3 Descripción teórica de la curva esfuerzo-deformación

El ensayo de tracción sobre una varilla de acero consiste en aplicar una carga axial estática monotónica con crecimiento gradual hasta que se logre la rotura de la varilla, la cual no se produce en el punto de carga máxima, sino cuando la sección de ésta se reduce hasta un punto débil de rotura.

En la figura (1) se muestra la curva típica esfuerzo-deformación que se obtiene al someter una probeta de acero a un ensayo de tracción, donde f_y, f_{su}, y f_{suu} son los esfuerzos de fluencia, máximo y el asociado a la fractura, respectivamente. ε_y, ε_{sh}, ε_{su} y ε_{suu} son las deformaciones de fluencia, la del inicio de la zona de endurecimiento por deformación, la última y la asociada a la fractura de la probeta, respectivamente. E_s es el módulo de elasticidad y E_{sh} es el módulo inicial de endurecimiento por deformación. En la curva esfuerzo-deformación se distinguen cuatro zonas [2]:

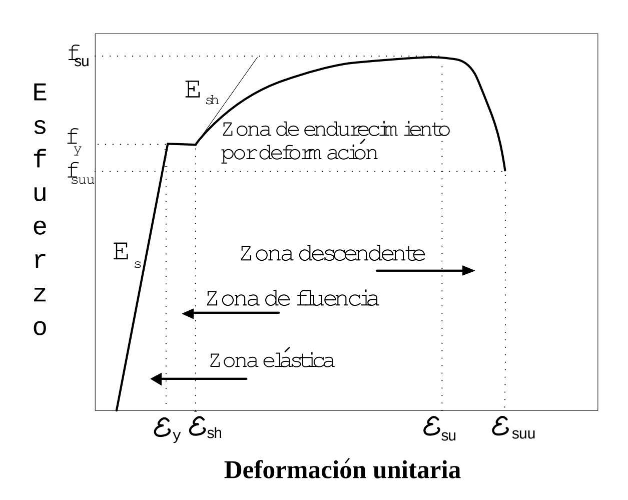


Figura 1: Curva típica esfuerzo-deformación de aceros de refuerzo

3.1 Zona elástica

Representada por una línea recta que inicia en el origen y finaliza en el punto de fluencia. El material se distingue por tener un comportamiento elástico. El esfuerzo en cualquier punto de la zona, f_s, se obtiene como el producto del módulo elástico E_s y su respectiva deformación ε_s

$$f_s = E_s * \varepsilon_s \,.$$

Cuando ε_s alcanza su valor máximo en esta zona, ε_y, el acero fluye y el esfuerzo asociado a dicha deformación, f_y, queda definido por

$$f_y = E_s * \varepsilon_y \,.$$

3.2 Zona de fluencia

Corresponde al tramo comprendido entre la deformación de fluencia, ε_y, y la deformación al inicio de la zona de endurecimiento por deformación, ε_{sh}. El acero tiene un comportamiento plástico. Esta zona no es totalmente plana, pero debido a sus pequeñas variaciones puede considerarse perfectamente horizontal [3]. El esfuerzo en esta zona se puede calcular como

$$f_s = f_y \,.$$

3.3 Zona de endurecimiento por deformación

Se refiere al tramo comprendido entre la deformación final de la plataforma de fluencia, ε_{sh} y la deformación correspondiente al esfuerzo máximo, ε_{su}. En esta zona las deformaciones aumentan más rápidamente que los esfuerzos, razón por la cual la gráfica toma una forma curva. Los esfuerzos de esta zona se definen mediante la siguiente expresión [4]:

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su})\left(\frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}}\right)^P .$$

El término P se puede calcular seleccionando un punto intermedio dentro de la zona de endurecimiento por deformación $(\varepsilon_{sh1}, f_{sh1})$:

$$P = \frac{\log\left(\dfrac{f_{su} - f_{sh1}}{f_{su} - f_y}\right)}{\log\left(\dfrac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh1}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}}\right)} .$$

4 Descripción del análisis estadístico

Para las probetas ensayadas se obtuvo la curva esfuerzo-deformación, a partir de la cual se encontraron esfuerzos y deformaciones características con las cuales se realizó el análisis estadístico y se determinó su variabilidad.

Los valores que caracterizan la curva esfuerzo-deformación se consideran variables continuas, por lo cual se puede buscar una aproximación de ajuste a una distribución normal. La información se clasificó según la empresa productora y el diámetro de la barra. La distribución de una serie de medidas se puede aproximar a una normal siempre y cuando la fuente de error sea la respuesta a muchas pequeñas causas independientes. Si hay uno o varias causas de error predominantes o si éstas no son independientes, las medidas presentarán un sesgo, y la distribución puede ser diferente a la normal.

Para determinar si las variables analizadas se ajustan a una distribución normal, se procedió a hacer una exploración visual de los datos que permitiera sugerir la forma de la distribución; posteriormente se graficó el histograma de frecuencias y se determinaron los parámetros media, moda, varianza y desviación estándar, con los cuales fue posible determinar el grado de asimetría de la distribución. Estos métodos se complementaron con procedimientos de análisis que cuantifican de un modo más exacto las aproximaciones a una distribución normal, entre los cuales se encuentran el coeficiente de Skewness, el de Kurtosis y las pruebas de bondad de ajuste a la normal a través de la Chi-cuadrado y la Kolmogorov Smirnov.

La tabla (1) presenta los valores estadísticos para el número total de barras ensayadas donde $\hat{\mu}$ es la estimación de la media aritmética, $\hat{\sigma}$ es la estimación de la desviación estándar y V es el coeficiente de variación. Adicionalmente, se presentan los valores máximos y mínimos, así como los percentiles del 5 y 95.

Tabla 1: Valores estadísticos para el total de barras ensayadas

Variable	No. Datos	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	Mínimo	Máximo	V	Percentil 5	Percentil 95
$f_y(Mpa)$	467	470,30	25,25	419,93	538,804	0,054	431,2	522,93
$\varepsilon_y(mm/mm)$	467	0,0024	0,0001	0,0021	0,0028	0,054	0,0022	0,0027
$f_{sh}(Mpa)$	477	472,16	25,67	419,64	543,80	0,054	432,77	525,38
$\varepsilon_{sh}(mm/mm)$	473	0,0138	0,0048	0,0022	0,0259	0,348	0,0045	0,0207
$f_{su}(Mpa)$	477	659,74	30,46	581,24	752,93	0,046	618,67	737,16
$\varepsilon_{su}(mm/mm)$	476	0,1141	0,0120	0,0613	0,1435	0,106	0,0948	0,1353
$f_{suu}(Mpa)$	476	536,35	62,89	319,77	701,29	0,117	441,10	637,00
$\varepsilon_{suu}(mm/mm)$	475	0,1407	0,0175	0,0828	0,1797	0,125	0,1144	0,1705
P	461	3,087	0,4487	1,762	5,026	0,145	2,403	3,945

4.1 Análisis de las variables

4.1.1 Variabilidad de f_y

La media de f_y fue igual a 470,30 Mpa (4799 kgf/cm^2) y el coeficiente de variación 0,054. El valor mínimo obtenido fue de 419,93 Mpa (4285 kgf/cm^2), aproximadamente igual al mínimo nominal especificado por la Norma Técnica Colombiana NTC 2289 [5], que especifica un valor de 420 Mpa (4285 kgf/cm^2). Sin embargo, dicha norma también establece como valor máximo de fluencia 540 Mpa (5510 kgf/cm^2), y el máximo valor encontrado fue igual a 538,804 Mpa (5498 kgf/cm^2).

Los resultados de todas las barras ensayadas se encuentran dentro del rango permitido por la norma, es decir, entre 420 Mpa (4285 kgf/cm^2) y 540 Mpa (5510 kgf/cm^2). Las varillas de diámetro igual a $\left(\frac{5}{8}\right)''$ presentan un valor medio de 484,90 Mpa (4948 kgf/cm^2); valor superior al mínimo especificado por la norma en un 13 por ciento aproximadamente. El coeficiente de variación es 0,0522 y el máximo valor de f_y es 530,08 Mpa (5409 kgf/cm^2). De igual forma, las muestras de $\left(\frac{3}{4}\right)''$ presentan un valor medio de 479 Mpa (4888 kgf/cm^2) con un coeficiente de variación de 0,0562 y un valor máximo de 538,80 Mpa (5498 kgf/cm^2).

4.1.2 Variabilidad de ε_y

La variable ε_y se calcula como la relación entre f_y y el módulo E_s, por lo tanto presenta el mismo comportamiento de f_y. La media fue igual a 0,0024 y el coeficiente de variación fue 0,054. El mínimo valor de ε_y encontrado fue igual a 0,0021 y correspondió a las varillas de $\left(\frac{1}{2}\right)''$ y 1″. El máximo valor fue de 0,0028 y se presentó en varillas de $\left(\frac{3}{4}\right)''$.

El valor E_s se supuso igual a 196000 Mpa ($2 \cdot 10^6\, kgf/cm^2$), tal como lo especifica la NSR−98 [6]. Como verificación de este valor, se efectuaron ensayos a 17 probetas torneadas obteniendo un valor promedio igual a 215600 Mpa ($2{,}2 \cdot 10^6\, kgf/cm^2$).

4.1.3 Variabilidad de f_{sh}

La media y el coeficiente de variación fueron de 472,16 Mpa ($4818\, kgf/cm^2$) y 0,054, respectivamente. Los resultados para dicha variable conservan cierta similitud con los obtenidos para f_y. Dichos resultados permiten considerar la plataforma de fluencia perfectamente horizontal, suponiendo f_{sh} igual a f_y.

4.1.4 Variabilidad de ε_{sh}

La media y el coeficiente de variación fueron iguales a 0,0138 y 0,348, respectivamente. El diámetro de $\left(\frac{3}{8}\right)''$ presenta el mayor coeficiente de variación igual a 0,543; la dispersión de los resultados se debe a que la mayoría de las barras de dicho diámetro ensayadas no presentaron plataforma de fluencia definida y por consiguiente se consideró para este caso un valor de ε_{sh} igual a ε_y. Resultados similares fueron reportados en aceros producidos en México [1] y en Nueva Zelandia [7].

4.1.5 Variabilidad de f_{su}

La media encontrada para las muestras ensayadas fue igual a 659,74 Mpa ($6732\, kgf/cm^2$) y el coeficiente de variación 0,046. La Norma NTC 2289 especifica para f_{su} un valor mínimo de 550 Mpa ($5612\, kgf/cm^2$), y el mínimo valor obtenido para el total de muestras fue superior e igual a 581,24 Mpa ($5931\, kgf/cm^2$). De igual forma dicha norma especifica que el esfuerzo máximo de una probeta de acero de refuerzo debe ser igual o mayor a 1,25 veces el esfuerzo de fluencia, f_y. Debe tenerse en cuenta que se debe cumplir con el mayor valor encontrado para los dos requisitos especificados por la norma. Con base en este análisis, es posible afirmar que todas las muestras ensayadas cumplen con estos requisitos.

4.1.6 Variabilidad de ε_{su}

La media y el coeficiente de variación de ε_{su} para las muestras ensayadas fueron iguales a 0,1141 y 0,106, respectivamente. La mayor dispersión de resultados se presentó para las muestras de $\left(\frac{3}{8}\right)''$ con un coeficiente de variación igual a 0,166 y un valor máximo de deformación última de 0,1435.

4.1.7 Variabilidad de f_{suu}

Para esta variable se obtuvo como media un esfuerzo de 536,35 Mpa ($5473\, kgf/cm^2$) y un coeficiente de variación de 0,117. Al igual que la variable ε_{su}, la mayor dispersión en los resultados se presentó en las muestras de $\left(\frac{3}{8}\right)''$ con un coeficiente de variación de 0,122.

4.1.8 Variabilidad de ε_{suu}

Su variabilidad es mayor a la presentada por ε_{su} con un coeficiente de variación de 0,125 y un valor medio de 0,1407. La máxima deformación se presentó en las varillas de diámetro igual a 1″ con un valor de 0,1797.

4.1.9 Variabilidad de P

Al ser P una variable que depende de los esfuerzos y deformaciones al inicio de la zona de endurecimiento por deformación, y del esfuerzo máximo y la deformación última, se puede apreciar que presenta una dispersión mayor. El análisis realizado muestra una media de 3,087 y un coeficiente de variación de 0,145. El máximo valor de P se presentó para las muestras de $\left(\frac{1}{2}\right)''$ con un valor de 5,03.

4.2 Curvas típicas de esfuerzo-deformación

La figura (2) muestra las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a los percentiles 5 y 95 para el total de las muestras ensayadas.

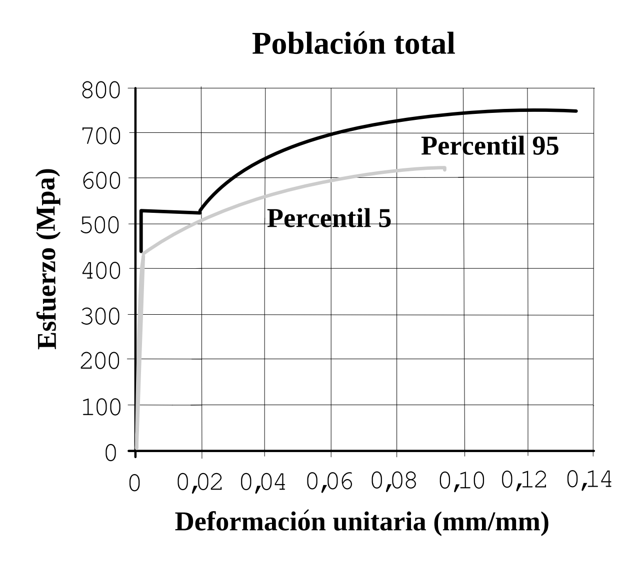


Figura 2: Curva esfuerzo-deformación representativa de la población total

La figura (3) contiene las curvas esfuerzo-deformación para los percentiles 5 y 95 por cada diámetro analizado.

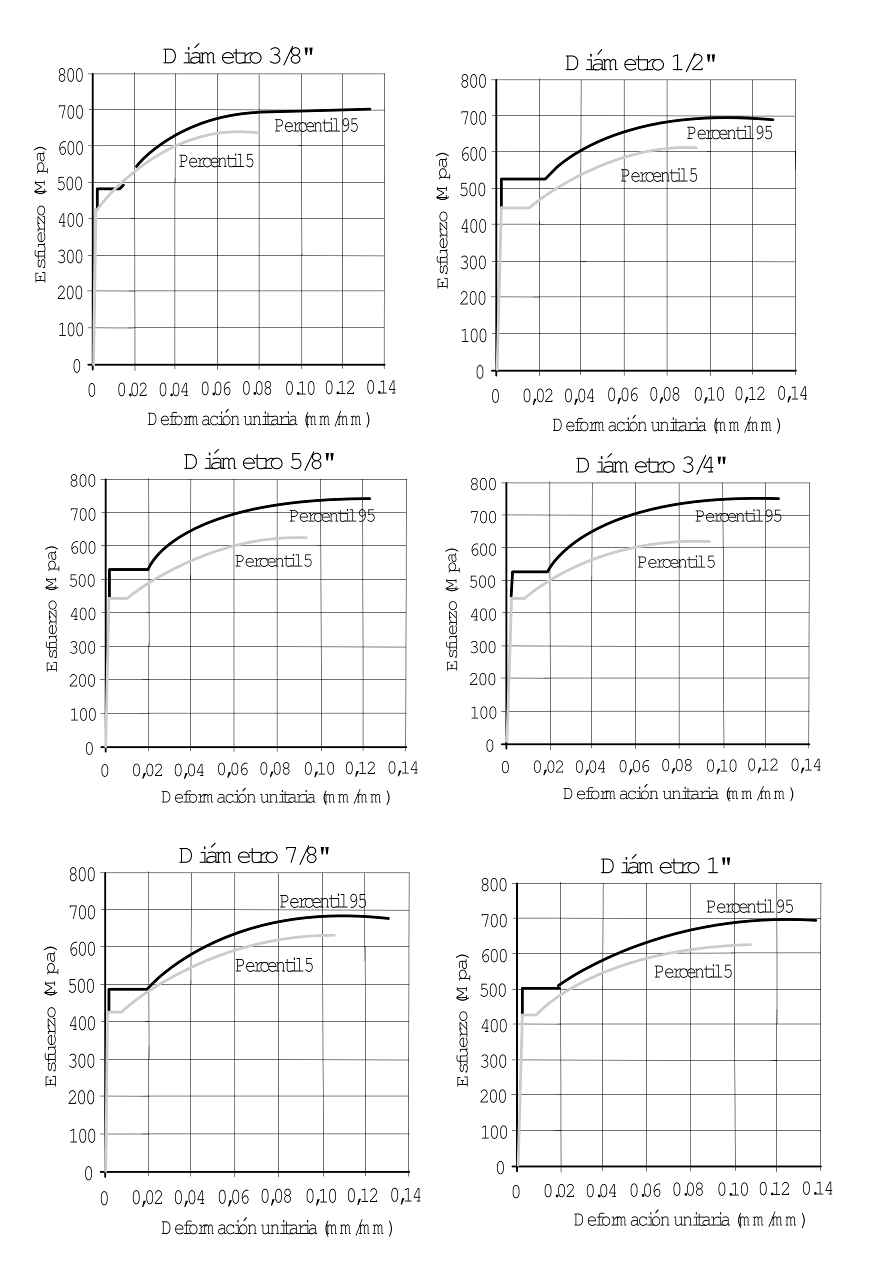


Figura 3: Curva esfuerzo-deformación según diámetro analizado

5 Comentarios finales

Se realizó un estudio experimental en donde se fallaron 477 probetas de diferentes marcas y diámetros, con el objetivo de obtener las propiedades mecánicas de los aceros de refuerzo producidos en Colombia, representados en las curvas de esfuerzo-deformación. Con los resultados obtenidos, se realizó el análisis estadístico de las principales variables que definen la curva esfuerzo-deformación de los aceros de refuerzo estudiados.

Del análisis estadístico efectuado para el total de varillas ensayadas, el mínimo esfuerzo de fluencia encontrado fue 419,93 Mpa ($4285\,kgf/cm^2$), valor aproximadamente igual al mínimo nominal especificado por la NTC 2289, lo que sugiere que en el ámbito nacional se lleva un control de calidad de producción adecuado; sin embargo, no sólo debe controlarse el esfuerzo mínimo de fluencia, sino también el esfuerzo de fluencia máximo, para el cual se encontró un valor de 538,80 Mpa ($5498\,kgf/cm^2$) muy cercano al máximo especificado por la norma (540 Mpa). Se debe tener en cuenta que esta característica puede ser desfavorable debido a que pueden presentarse modos de falla, tales como el cortante, generalmente no considerados en el proceso de diseño, los cuales incrementan las demandas de ductilidad en la estructura con distribución irregular de resistencias [1].

Observando las curvas esfuerzo-deformación típicas para cada diámetro, se puede evidenciar que la plataforma de fluencia para las varillas de diámetro $\left(\frac{3}{8}\right)''$ es muy pequeña comparada con el resto de los diámetros analizados. El hecho de que muchas de las varillas de $\left(\frac{3}{8}\right)''$ ensayadas no presentaran plataforma de fluencia bien definida, generó un grado de incertidumbre mayor en la determinación de las variables f_{sh} y ε_{sh}, las cuales se tomaron en dichos casos igual a f_y y ε_y. Resultados similares fueron reportados en aceros de refuerzo producidos en México [1] y Nueva Zelandia [7].

El hecho de que se presenten diferencias en los estadísticos correspondientes a las propiedades mecánicas del acero de refuerzo de $\left(\frac{3}{8}\right)''$ con relación a los otros diámetros, sugiere que tal característica debe tomarse en cuenta en la evaluación de la respuesta sísmica de elementos de concreto reforzado.

Una vez efectuado el análisis estadístico fue posible seleccionar una curva esfuerzo-deformación representativa de las propiedades mecánicas del acero de refuerzo en la cual es posible evidenciar las tres zonas que conforman dicha curva; de igual forma se seleccionaron curvas esfuerzo-deformación que permiten caracterizar el acero de acuerdo al diámetro analizado.

Los resultados se clasificaron en dos categorías diferentes, la primera conformada por el número total de muestras ensayadas, y la segunda a su vez subdividida en seis grupos distintos según el diámetro de la barra analizada. Para la primera categoría y los seis grupos estudiados se seleccionaron dos curvas esfuerzo-deformación asociadas a los percentiles 5 y 95, con las cuales se pretende revisar el comportamiento sísmico de edificios empleando diagramas momento-curvatura calculados a partir de los datos experimentales y compararlos con los datos nominales, de tal forma que se puedan obtener criterios suficientes para revisar la norma colombiana de diseño sismorresistente NSR−98 [6], referente a las propiedades de los materiales que conforman los elementos de concreto reforzado y a la respuesta sísmica de edificios.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias y a Diaco la financiación del proyecto; a los ingenieros Jairo Fajardo y Luz Adiela Jaramillo, el apoyo recibido; a Laminados Andino S.A., Aceros Sogamoso, Sidunor y Sidor, la colaboración prestada.

Referencias

[1] Rodríguez M. y Botero J. C., *Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México*, UNAM, Series del II, 575, 1996.

[2] Botero J. C., *Pandeo en barras de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles*, Tesis de Maestría, UNAM, 1996.

[3] Restrepo J. I., Dodd L. L, Park R., *Variables affecting cyclic behavior of reinforcing steel*, Journal of Structural Engineering, ASCE, **120**(11), 1994.

[4] Mander J.B., *Seismic design of bridge piers*, Ph.D thesis supervised by M.J.N. Priestley and R. Park, University of Canterbury, New Zealand, 1984.

[5] Norma Técnica Colombiana NTC 2289, *Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación para refuerzo de concreto*, esta norma es una adopción modificada de la ASTM A706/A M:2001, octubre 30 de 2002.

[6] NSR-98 *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Ley 400 de 1997, Bogotá, Colombia, 1998.

[7] Dodd, L. L. y Restrepo Posada, J. I., *Model for predicting cyclic behavior of reinforced steel*, Journal of structural engineering, ASCE, **121**(3), 1995.